

## **5 Solarthermische Anlagen für Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung**

Prof.Dr.Ursula Eicker

### **-5.1 Allgemeines**

Bis 2020 soll der erneuerbare Anteil an der gesamten Wärme- und Kälteversorgung Deutschlands verdoppelt werden und damit auf 14% steigen. Dabei muss die Solarwärme ihren bisher geringen Anteil an der erneuerbaren Wärmeversorgung von nur 4% deutlich steigern, da die Ressourcen der heute dominierenden Biomasse in Deutschland begrenzt sind. Solarthermische Anlagen erfüllen neben anderen erneuerbaren Energien die neuen Auflagen des erneuerbare-Energien-Gesetz Wärme (EEWärmeG), wenn im Neubau 15% des Wärmeenergiebedarfs solar gedeckt wird. In einigen Bundesländern wie Baden Württemberg besteht zusätzlich eine Pflicht zum Einsatz erneuerbarer Wärme im Bestand, wenn die Heizungsanlage ausgetauscht wird. Mit 0.04 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Quadratmeter Wohnfläche sind auch hier die Anforderungen erfüllt.

Seit Mitte der achtziger Jahre ist die jährlich installierte Kollektor-und Absorberfläche von 25000 auf mehr als 2 100 000 m<sup>2</sup> oder 1470 MW installierte Leistung angestiegen (Marktdaten 2008). 11.3 Millionen m<sup>2</sup> installierte Kollektorfläche bzw. 7900 MW installierte Leistung vermeidet jährlich ca. 1.2 Millionen Tonnen des Treibhausgases Kohlendioxid. Die thermische Nutzung der Solarenergie substituiert in Deutschland jährlich ca. 3700 Millionen kWh Endenergie – ein noch geringer Beitrag von 0.27 Prozent des Gesamtwärmeverbrauchs (BMU, 2008). Für 2010 wird ein jährliches Potential von 4500 Millionen kWh erwartet. Die europäische Solarthermieplattform ESTTP geht davon aus, dass 2030 rund 50% des Gesamtwärmebedarfs der EU durch Solarthermie gedeckt werden kann.

Solarthermische Kollektoren werden zur Trinkwassererwärmung, zur Heizungsunterstützung von Gebäuden, zur Schwimmbadbeheizung, für die Prozesswärmeerzeugung und die solare Kühlung eingesetzt. Das vorrangige Einsatzgebiet ist immer noch im Ein- oder Zweifamilienhaus.

53% der deutschen Wohneinheiten und damit des Wärmebedarfs liegen jedoch in Mehrfamilienhäusern, in denen jedoch nur etwa 1% der Solarwärmanlagen installiert wurde. Bis 2050 soll der Endenergiebedarf für Wärme halbiert werden und die Solarthermie 25% des Wärmebedarfs in Deutschland decken. Dazu ist ein Strukturwandel von den heute mit 88% dominierenden Einzelheizungen zu netzgebundener Versorgung erforderlich. 2050 soll der Anteil von netzgebundener Wärme von heute 12% auf 60% steigen (Nitsch, 2008). Solarthermische Anlagen können am effizientesten in große solar gestützte Nahwärmenetze mit oder ohne saisonale Speicher eingebunden werden. Insgesamt müssen etwa 250 Millionen Quadratmeter Kollektorfläche installiert werden, um 25% Bedarf zu decken.

Auch solare Prozesswärme hat ein hohes Potential in Deutschland mit etwa 100 GW substituierbarer thermischer Leistung. Für den Temperaturbereich über 100°C sind mittlerweile doppelt verglaste Kollektoren zur Reduzierung der Wärmeverluste marktverfügbar.

Inzwischen sind in Deutschland mehr als 1.2 Millionen Solaranlagen installiert. In den letzten 15 Jahren ist Solarwärme etwa 40% billiger geworden und große solarthermische Anlagen können heute wirtschaftlich betrieben werden. Mehr als 75% der Wertschöpfung verbleibt im Inland.

### **-5.2 Kollektoren**

Thermische Solarkollektoren werden ihrer Bauart und dem Wärmeträgermedium nach unterschieden. Die meisten Kollektoren verwenden Wasser als Wärmeträger, versetzt mit Frostschutzmittel, einige Systeme werden mit Luft betrieben. Kollektoren für

Schwimmbadanlagen, Flachkollektoren und Vakuum-Röhrenkollektoren unterscheiden sich im Wesentlichen durch die abnehmenden Wärmeverluste zwischen Absorber und Umgebung. Verglaste Abdeckungen reduzieren die langwelligen Strahlungs- und Konvektionsverluste, eine zusätzliche Evakuierung zwischen Absorber und Verglasung vermeidet fast vollständig die Konvektionsverluste.

Während in Deutschland bisher nur 12% des Kollektormarktes aus Vakuumröhren bestehen, werden im größten Abnehmerland solarthermischer Anlagen China fast ausschliesslich Vakuumröhrenkollektoren eingesetzt.

Der Flachkollektor besteht aus meist selektiv beschichteten Metallabsorbern aus Kupfer oder Aluminium mit integrierten Röhren für die Trägerflüssigkeit. Zur Verringerung von Wärmeverlusten an die Umgebung ist die Rückseite des Absorbers gedämmt und die Oberfläche wird mit einer ein- oder zweischichtigen Glasscheibe abgedeckt (Bild 2.2.2-86). Zur Gewichtsreduktion können für die zweite Schicht auch dünne Polymer Folien verwendet werden.

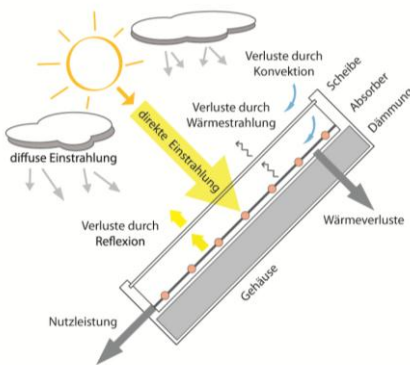


Bild 2.2.2-86. Querschnitt durch einen Flachkollektor.

Flachkollektoren lassen sich als Indachlösung mit guter Optik und geringer Windangriffsfläche integrieren. Bei nachträglichen Installationen werden oft Aufdachlösungen gewählt mit Kollektorbefestigungen über Sparrenanker bei einem Abstand zur Eindeckung von etwa 6-8 cm. Bei Flachdächern werden meist aufgeständerte Anlagen gebaut (Bild 2.2.2-87). Bei solaren Großanlagen ist die Aufständigung etwa 20-30% teurer als die Dachintegration von Großflächenkollektoren. Die Bruttodachfläche wird nur zu etwa 50 bis maximal 60% genutzt, da gegenseitige Verschattung der Kollektoren vermieden werden muss. Bei Schrägdächern kann die Ausnutzung bis zu 90% betragen. Die Anforderung an die Statik aufgrund der Windlasten ist bei Aufständigung deutlich höher. Bei Kollektoranlagen über 50 m<sup>2</sup> sollten die einzelnen Module mindestens 5 m<sup>2</sup> groß sein. Bewährt haben sich komplette Kollektordächer, die eine sehr schnelle Montage innerhalb ein bis zwei Tagen auch für sehr große Anlagen mehrerer hundert Quadratmeter ermöglichen. Um die Dachdichtigkeit zu gewährleisten, sollte die Dachneigung mindestens 20° betragen.

Ein Standard Flachkollektor kostet je nach Hersteller 120 bis 450 €/m<sup>2</sup> Kollektorfläche und liefert jährlich ca. 300 bis 550 kWh/m<sup>2</sup> Solarwärme.

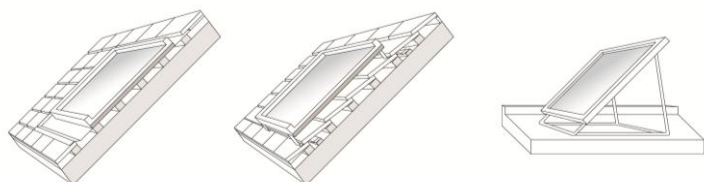
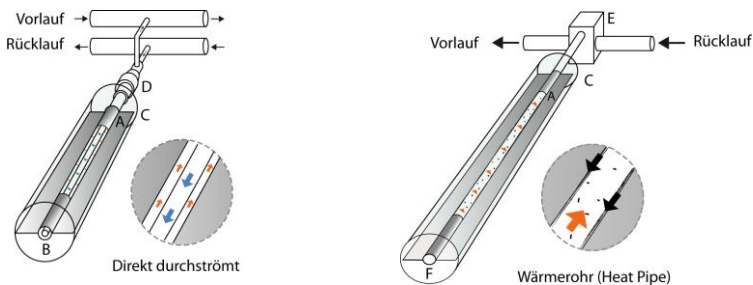


Bild 2.2.2-87: Montagevarianten für Flachkollektoren im Dachbereich: Indach, Aufdach, Aufgeständert.

Beim Vakuum-Röhrenkollektor befindet sich der Absorber in einem evakuierten Glasrohr. Der Absorber ist entweder als Metallstreifen analog zum Flachkollektor oder als Beschichtung einer evakuierten Doppelglasröhre ausgeführt. Der Wärmetransport erfolgt direkt, indem die Wärmeträgerflüssigkeit die Absorberrohre durchströmt (Bild 2.2.2-88), oder indirekt mittels Wärmerohr (heat pipe). Beim Wärmerohrprinzip transportiert ein Kältemittel Wärme vom Absorber zum Wärmetauscher am oberen Kollektorende. Das Kältemittel, z.B. Wasser oder Alkohol, verdampft durch die Wärmeaufnahme und steigt im Wärmerohr auf. Die Wärmeträgerflüssigkeit, die den Wärmetauscher durchströmt, nimmt die Wärme auf, und das Kältemittel kondensiert. Das flüssige Kältemittel fließt durch das gegebene Kollektorgefälle wieder nach unten.

Vakuum-Röhrenkollektoren kosten zwischen 500 bis 900 €/m<sup>2</sup> für Kleinanlagen. Bei Anlagen über 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche sind Preise zwischen 300 und 500 €/m<sup>2</sup> möglich.

Bild 2.2.2-88. Vakuumröhrenkollektoren mit direkter Durchströmung und als Wärmerohr ausgeführt (A = Absorber, B = Doppelrohr, C = Vakuum-Glasröhre, D = Rohrverschraubung, E = Wärmetauscher mit Kondensator, F = Wärmerohr mit Wasser oder Alkoholfüllung)



Zur Reduzierung von Wärmeverlusten und mechanischen Beanspruchungen durch die Metall/Glasverbindung wurde die sogenannte „Sidney“ Röhre mit einem evakuierten Doppelglas entwickelt, auf deren Innenseite der Absorber aufgedampft ist. Zur Nutzung der kompletten runden Absorberfläche werden oft zusätzliche Reflektoren als sogenannte CPC Kollektoren eingesetzt (siehe Bild 2.2.2.-89). Der externe Spiegel unterliegt jedoch Witterungseinflüssen. Alternativ können Reflektoren auf der Innenseite des äußeren Glasrohres eingesetzt werden.

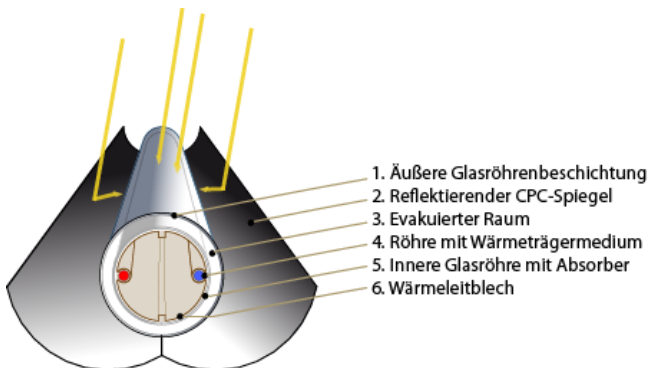


Bild 2.2.2.-89: Doppelglas-Vakuümrohrenkollektor mit CPC Reflektor

Luftkollektoren (Bild 2.2.2-90) werden derzeit in Deutschland in geringerem Umfang eingesetzt. Luftheizsysteme auf solarer Basis nutzen Kollektoren zur direkten Beheizung der Außenluft. Luftkollektoren lassen sich gut mit mechanischen Lüftungssystemen kombinieren oder als Wärmequelle für eine Wärmepumpe betreiben. Über einen Wärmetauscher ist auch die Trinkwarmwassererzeugung möglich.

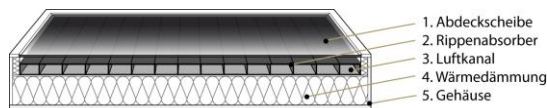


Bild 2.2.2-89: Aufbau eines solarthermischen Luftkollektors

Die Stillstandtemperatur (keine Wärmeabnahme) von Flachkollektoren liegt bei etwa 160-200°C, bei Vakuümrohren zwischen 200 und 300°C. Bei solchen Temperaturen muss unbedingt temperaturbeständige Wärmedämmung verwendet und Weichlöten der Solarkreisverrohrung vermieden werden. Für hocheffiziente Vakuümrohren sollten spezielle Solarflüssigkeiten verwendet werden, um Ablagerungen im Kollektor zu vermeiden. Ein Vorteil von Vakuümrohrenkollektoren mit Heat Pipes liegt in der Begrenzung der maximalen Stillstandtemperatur auf etwa 130-150°C, bei welcher der komplette Absorberinhalt verdampft ist und sich im Kondensator befindet.

Die Lebensdauer solarthermischer Kollektoranlagen liegt bei mindestens 30 Jahren, die der elektronischen Komponenten bei etwa 20 Jahren. Herstellergarantien sind meist auf 10 bis 12 Jahre begrenzt. Vorschriften über Sicherheit, Prüfung und Wirkungsgrade befinden sich in den europäischen Normen EN 12975, EN 12976 und ENV 12977. Die energetische Bewertung solarthermischer Anlagen erfolgt auf der Basis der DIN V4701-10.

#### -5.2.1 Wirkungsgrade

Die Nutzleistung und der Wirkungsgrad thermischer Kollektoren werden durch die optischen Eigenschaften der transparenten Abdeckung und des Absorbers sowie die Wärmeverluste zwischen Absorber und Umgebung bestimmt. Ist die mittlere Absorbertemperatur  $T_a$  bekannt, erhält man die flächenbezogene Nutzleistung aus einer einfachen Leistungsbilanzbetrachtung. Die durch die Abdeckung mit dem Transmissionsgrad  $\tau$  transmittierte und mit dem Absorptionsgrad  $\alpha$  absorbierte Einstrahlung  $G$  minus den Wärmeverlusten gegenüber

Umgebungstemperatur  $T_o$  ergibt die Nutzleistung  $\dot{Q}_n$  pro Quadratmeter Aperturfläche  $A$ . Bei der Angabe der Bezugsfläche muss unbedingt zwischen Absorberfläche und Aperturfläche unterschieden werden, da insbesondere bei Vakuümrohrenkollektoren die Absorberfläche deutlich kleiner als die Aperturfläche oder auch die Bruttokollektorfläche ist.

$$\frac{\dot{Q}_n}{A} = G\tau\alpha - U_t (T_a - T_o)$$

Der Wirkungsgrad des solarthermischen Kollektors ergibt sich aus dem Verhältnis der flächenbezogenen Nutzleistung durch die Einstrahlung in der Kollektorebene.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_n}{AG} = \tau\alpha - U_t \frac{(T_a - T_o)}{G}$$

$\eta_0$  stellt den optischen Wirkungsgrad des Kollektors dar. Der Wärmedurchgangskoeffizient des Kollektors  $U_t$  setzt sich aus den Verlusten über die Kollektorständer- und Rückseite sowie die Seitenflächen zusammen. Das Verhältnis aus der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung  $T_a - T_o$  und Einstrahlung  $G$  wird als reduzierter Parameter bezeichnet.

Die Temperatur auf dem Absorberblech  $T_a$  ist jedoch eine komplizierte Funktion des Abstands von den wärmeabführenden Fluidröhren sowie der Absorberlänge, so dass der Mittelwert nicht einfach verfügbar ist. Messbar ist dagegen die Fluideintrittstemperatur in den Kollektor oder auch die mittlere Fluidtemperatur, die bei nicht zu geringen Durchflussmengen durch den arithmetischen Mittelwert zwischen Ein- und Auslasstemperaturen gegeben ist. Vor allem die Darstellung der Nutzenergie als Funktion der Fluideintrittstemperatur ist für Systemsimulationen sehr nützlich, da die Fluideintrittstemperatur durch die Speichertemperatur vorgegeben ist.

In der Kollektorprüfung hat sich für die Wirkungsgradkennlinie die Verwendung der mittleren Fluidtemperatur durchgesetzt. Der Wirkungsgradfaktor  $F'$  aus der Lösung der Temperatur-Differentialgleichungen gibt das Verhältnis aus der tatsächlichen Nutzleistung zu der höheren Nutzleistung an, die sich für ein Absorberblech auf der niedrigen mittleren Fluidtemperatur  $T_m$  ergeben würde (mit entsprechend geringeren Wärmeverlusten).

$$\eta = \frac{F' \tau\alpha - F' U_t (T_m - T_o)}{\eta_{0,eff} G}$$

Die Temperaturabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten, die insbesondere bei hohen Kollektortemperaturen zu einem nichtlinearen Abfall des Wirkungsgrades führt, wird durch eine einfache lineare Funktion angenähert

$$F' U_t = a_1 - a_2 (T_m - T_o)$$

Daraus ergibt sich für die Kennlinie folgende einfache Gleichung:

$$\eta = \eta_{0,eff} - \frac{a_1 \Delta T}{G} - \frac{a_2 \Delta T^2}{G}$$

Die Parameter der Kennlinien werden nach dem in EN 12975-1 beschriebenen Verfahren experimentell bestimmt. Beispielhafte Werte für einen Flachkollektoren bezogen auf die Absorberfläche liegen für  $\eta_{0,eff}$  zwischen 75 und 85%, mit einem linearen Wärmeverlustkoeffizienten  $a_1$  zwischen 2.6 und 4.0 W m<sup>2</sup>K<sup>-1</sup> und einem quadratischen

Wärmeverlustkoeffizienten  $a_2$  von 0.006 und 0.022  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-2}$ . Bei Vakuumröhren liegen typische optische Wirkungsgrad zwischen 62 und 77%, der Wert  $a_1$  zwischen 0.8 und 1.7  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$  und  $a_2$  zwischen 0.001 und 0.02  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-2}$ .

Eine Reihe von Kennlinien heute verfügbarer Flach- und Vakuumröhrenkollektoren sind in Bild 2.2.2-90 dargestellt. Die Abbildung charakterisiert die Arbeitsbereiche für Solaranlagen. Mit zunehmendem Temperaturunterschied sinkt der Wirkungsgrad des Flachkollektors deutlich stärker gegenüber den Vakuumröhrenkollektoren. Aus dem Schnittpunkt der Kennlinie mit der Ordinate ergibt sich der Konversionsfaktor  $\eta_{0,eff}$  als maximaler optischer Wirkungsgrad bei  $\Delta T = 0 \text{ K}$ . Um eine gegebene Temperaturdifferenz zur Umgebung zu erzeugen, werden bei zunehmender Solareinstrahlung höhere Wirkungsgrade erzielt (der reduzierte Parameter ist kleiner).

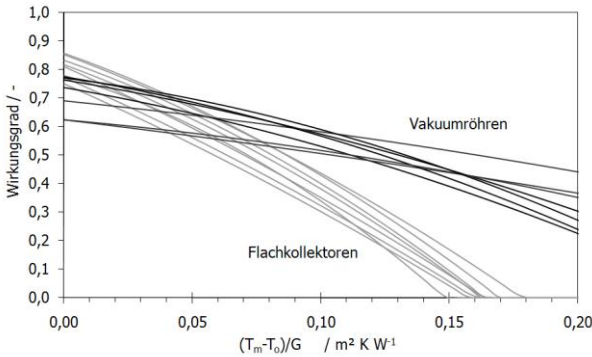


Bild 2.2.2-90: Wirkungsgradkennlinien handelsüblicher Flach- und Vakuumröhrenkollektoren.

Optimale Neigungswinkel von Kollektoren liegen bei Südorientierung etwa bei der geographischen Breite minus  $10^\circ$ , also in Deutschland um die  $40^\circ$ . Zwischen  $20^\circ$  und  $60^\circ$  Neigung reduziert sich die jährliche Einstrahlung um lediglich 5% bei Südausrichtung. Abweichungen von der Südorientierung bis zu  $50^\circ$  führen zu einer Einstrahlungsminderung von 10% (siehe Bild 2.2.2-91). Die Strahlungsenergie der Sonne auf eine horizontale Fläche in Deutschland liegt je nach Region zwischen 915 bis 1170 kWh pro Quadratmeter und Jahr. Dieser Wert entspricht etwa 90% der maximalen jährlichen Einstrahlung. In Südeuropa sind Werte bis 1600 kWh/m<sup>2</sup> a möglich (siehe Bild 2.2.2-92).

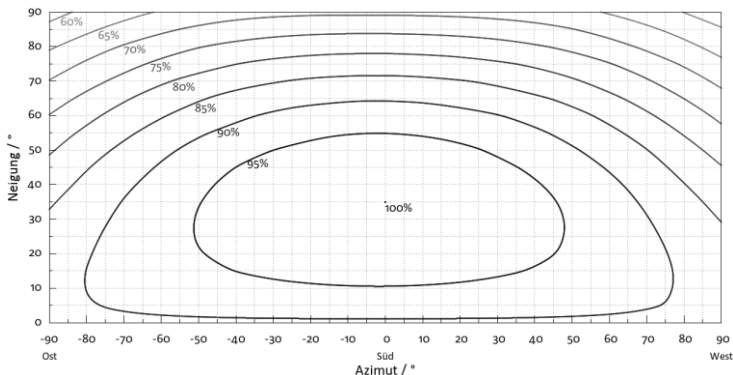
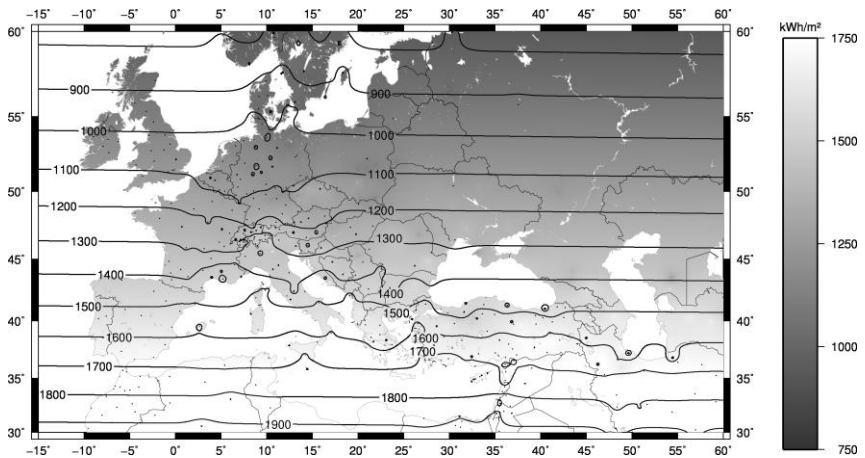


Bild 2.2.2-91: Prozentuale Einstrahlungsverluste für Flächen mit unterschiedlichen Azimutwinkeln ( $0^\circ$  entspricht Süd) und Neigungswinkeln ( $0^\circ$  entspricht der Horizontalen,  $90^\circ$  einer Fassade) für den Standort Stuttgart.



**Bild 2.2.2.92:**

Jährliche Einstrahlung auf die horizontale Fläche in kWh pro Quadratmeter generiert aus der INSEL Wetterdatenbank ([www.insel.eu](http://www.insel.eu)).

### -5.3 Systemtechnik

Die Systemtechnik von Solaranlagen umfaßt die Hauptkomponenten Kollektor und Speicher sowie die Solarkreishydraulik und Sicherheitstechnik. Während bei kleinen Solaranlagen die Wärmeübertragung über speicherintegrierte Wärmetauscher erfolgt, müssen bei großen solarthermischen Anlagen externe Wärmeübertrager eingesetzt werden. Innenliegende Wärmetauscher sind mit Flächen von 1 bis 2 m<sup>2</sup> in 200 bis 500 Liter Speichern auf etwa 5 kW Leistung begrenzt. Bei größeren Anlagen müssen daher externe Wärmetauscher eingesetzt werden, die einen zweiten Pumpenkreislauf erfordern. Durch die erzwungene Strömung an beiden Seiten der wärmeübertragenden Fläche steigen die Übertragungsleistungen von Gegenstrom-Plattenwärmetauschern auf 1000-4000 W/m<sup>2</sup>, womit bei Plattenabständen von wenigen Millimetern pro m<sup>3</sup> Bauvolumen sehr hohe Leistungen übertragen werden können.

Für die Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus sind Speichervolumen von 200 bis 500 Litern ausreichend. Die Speicherkosten liegen bei etwa 3000 Euro pro m<sup>3</sup>.

Große Solaranlagen mit geringen Deckungsanteilen werden mit Kurzzeitspeichern (Tagesspeicher) gebaut. Kostengünstige Standard-Stahlspeicher mit maximal 5 m<sup>3</sup> Volumen können dann in Serie bis zu 3 Einheiten geschaltet werden. Die Speicherkosten liegen bei 700 bis 1500 Euro pro m<sup>3</sup>. Bei Anlagen mit Mehrtagespeichern können Stahlpufferspeicher bis zu 200 m<sup>3</sup> Volumen verwendet werden.

Die Energiedichten von Wasserspeichern liegen bei etwa 60 kWh/m<sup>3</sup>, abhängig vom nutzbaren Temperaturniveau. Latentwärmespeicher auf Basis von Salzhydraten oder Paraffinen weisen etwa doppelt so hohe Speicherdichten auf. Thermochemische Speicher basieren auf Adsorptionsprozessen an Silikagelen oder Zeolithen mit 2-3 facher Speicherdichte oder chemischen Reaktion bis zu 10 facher Speicherdichte von

Wasserspeichern. Bei der Dehydratisierung von Salzhydraten im Temperaturbereich von 100 – 150°C werden Speicherdichten von 630 kWh/m<sup>3</sup> erzielt. Erste Prototypen sind mittlerweile im Labortest.

In den meisten solarthermischen Anlagen wird der Wärmeträger in einem geschlossenen Rohrsystem mit einer Pumpe zwangsumgewälzt. Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0.4 und 0.7 m s<sup>-1</sup> sind für Wasser-Glykolegemische empfehlenswert, um die Druckverluste gering zu halten und eine gute Entlüftung zu gewährleisten. Bei Anlagengrößen bis 40 m<sup>2</sup> liegen typische Gesamtdruckverluste zwischen 0.3 - 0.8 x 10<sup>5</sup> Pa, jeweils zu einem Drittel durch das Kollektorfeld, die Rohrleitungen und den Wärmetauscher verursacht. Bei Anlagen zwischen 40-100 m<sup>2</sup> ist ein Kollektorfelddruckverlust von 0.4 x 10<sup>5</sup> Pa akzeptabel, der restliche Solarkreis sollte auf 0.6 x 10<sup>5</sup> Pa begrenzt bleiben. Bei Großanlagen über 100 m<sup>2</sup> sind typische Druckverluste von 0.7 x 10<sup>5</sup>Pa im Kollektorfeld und 0.9 x 10<sup>5</sup>Pa im Solarkreis zu erwarten.

Die elektrische Jahresarbeitszahl als Verhältnis des solaren Nutzertrags zur jährlichen elektrischen Hilfsenergie liegt bei kleinen Solaranlagen typisch bei 20, bei größeren Anlagen mit hocheffizienten Pumpen bis 50 (Wesselak und Schabbach, 2009).

Bei Thermosyphonanlagen zirkuliert die Kollektorflüssigkeit durch dichteinduzierten Auftrieb in den darüber liegenden Speicher. Der Hilfsenergiebedarf ist daher Null. Der Jahresenergieertrag bei einem mit Frostschutz gefüllten System mit Mantelwärmeübertrager im Speicher liegt zwischen also 5929 MJ solarer Ertrag bei 200 Litern pro Tag Verbrauch für eine Aperturfläche von 1.86 m<sup>2</sup> pro Kollektor bei 2 Kollektoren insgesamt, richtig?

Und 7506 MJ bei 300 Litern pro Tag.

Ein Ausdehnungsgefäß ist wesentlicher Bestandteil des Überhitzungsschutzes: da bei Anlagenstillstand und üblichem Systemdruck von 3 bis 6 x 10<sup>5</sup> Pa die Solarkreisflüssigkeit im Kollektor siedet, nimmt bei kleinen Anlagen das Ausdehnungsgefäß nicht nur die Volumenvergrößerung der Solarkreisflüssigkeit von etwa 10%, sondern auch den kompletten verdampfenden Kollektorinhalt von etwa 0.5 bis 2 Litern pro Quadratmeter Kollektorfläche auf. Betriebserfahrungen mit großen Solaranlagen haben gezeigt, dass verdampfter Wärmeträger im gesamten Kollektorfeld, in der Kollektorfeldverrohrung und in etwa einem Drittel der Kollektorkreisverrohrung auftritt. Teilweise tritt Dampf bis in den Heizungskeller auf. Es ist sinnvoll, die Ausdehnungsgefäße auf dieses Volumen auszulegen und gegebenenfalls das Sicherheitsventil auf Abblasen bei höheren Drucknivaus (bis etwa 8 bar) zu dimensionieren.

### **-5.3.1 Trinkwassererwärmung**

Bild 2.2.2-93 zeigt eine thermische Solaranlage mit speicherintegrierten Wärmetauschern für Solaranlage und zentrale Nachheizung. Die Pumpe geht bei einer Temperaturdifferenz von etwa 5-8 K zwischen Kollektor und Speicher in Betrieb und schaltet bei Absinken der Temperaturdifferenz auf 2-3 K wieder ab.

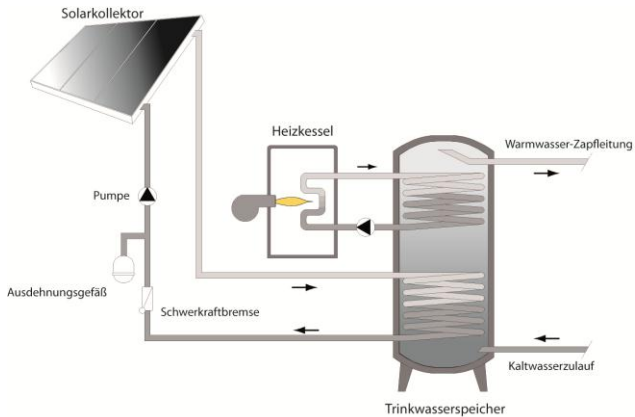


Bild 2.2.2-93. Trinkwassererwärmung durch Solarkollektoren mit zentraler Nachheizung.

Der durchschnittliche jährliche Deckungsgrad für die Trinkwarmwasserbereitung liegt bei etwa 60%, wobei in den strahlungsreichen Sommermonaten 100% des Bedarfs gedeckt werden. Dafür werden etwa 1-1.5 m<sup>2</sup> Flachkollektorfläche oder 0.8-1.3 m<sup>2</sup> Vakuumröhrenkollektoren pro Person benötigt. Der dazugehörige Trinkwasserspeicher bemisst sich nach der Anzahl der Personen und dem durchschnittlichen Verbrauch von etwa 40 Liter pro Tag: übliche Speichergrößen für einen 4 Personenhaushalt liegen bei 300 Litern, bei sechs Personen sind 500 Liter empfehlenswert.

Die Systemkosten betragen abhängig von Fabrikat und Bauart zwischen 600 und 1500 €/ m<sup>2</sup> Kollektorfläche. Die gesamten Systemkosten teilen sich im Durchschnitt wie folgt auf: 36% Kollektormodule, 21% Montage, 26% Speicher mit Wärmetauscher, 8% Solarstation incl. Regelung und 9% Sonstiges.

Bei Investitionskosten von 4000 bis 6000 € für eine Solaranlage zur Trinkwassererwärmung und einer Lebensdauer von 20 Jahren liegen die Wärmegestehungskosten für Kleinanlagen ohne Förderung zwischen 0.14 und 0.30 €/kWh. Bei solaren Großanlagen über 100 m<sup>2</sup> Brutto-Kollektorfläche sind je nach Speichergröße Systemkosten von 450 bis 600 Euro/m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche realistisch. Daraus ergeben sich dann Wärmepreise, die zwischen 0.05 und 0.15 €/kWh liegen und damit durchaus konkurrenzfähig sind. Die energetische Amortisationszeit einer Solaranlage zur Warmwassererzeugung liegt zwischen 12 und 24 Monaten.

### -5.3.2 Heizungsunterstützung

Heizungsunterstützende solarthermische Anlagen dominieren mittlerweile den Markt. Zwischen den monatlichen solaren Einstrahlungs- bzw. Kollektorertragsmaxima und dem Heizwärmebedarf von Gebäuden besteht eine etwa halbjährige Phasenverschiebung. Sensible Wärmespeicher haben jedoch nur eine geringe Wärmespeicherkapazität von wenigen Tagen. Dies hat zur Folge, dass heizungsunterstützende Anlagen meist für nicht mehr als 15-30% Deckungsgrad des Heizwärmebedarfs ausgelegt werden, da sonst sommerliche Überhitzung, längerer Anlagenstillstand und sinkende flächenspezifische Kollektorerträge unvermeidlich sind. Kollektorflächen zwischen 10-20 m<sup>2</sup> pro Wohneinheit können jedoch neben der ganzjährigen Trinkwassererwärmung ohne nennenswerte Ertragsreduzierung für die Heizungsunterstützung eingesetzt werden.

Am Beispiel eines 2005 errichteten Stuttgarter Mehrfamilienhauses mit 1600 m<sup>2</sup> Grundfläche wird die Notwendigkeit der Energiespeicherung für hohe solare Deckungsgrade deutlich. Wird die Solaranlage von 60 m<sup>2</sup> für Trinkwassererwärmung

(entspricht 1.5 m<sup>2</sup>/Person) auf 150 m<sup>2</sup> zur Heizungsunterstützung vergrößert (bei Speichervolumen von 3.6 und 9 m<sup>3</sup>), entstehen in den Sommermonaten hohe Solarerträge, die nur teilweise genutzt werden können (siehe Bild 2.2.2-94).

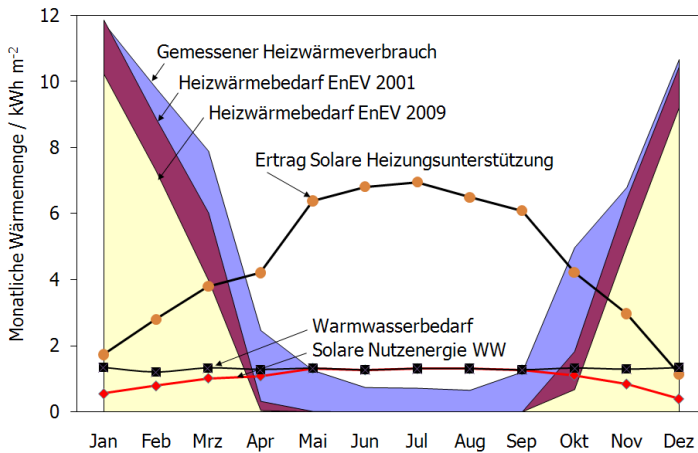


Bild 2.2.2-94: Heizwärme und Warmwasserbedarf eines Mehrfamilienhauses zusammen mit solarer Nutzenergie für Warmwasser und des möglichen Ertrags einer Heizungsunterstützenden Anlage. Neben den Messwerten des Heizwärmeverbrauchs sind die Angaben der EnEV 2001 dargestellt sowie die heute gültigen niedrigen Bedarfswerte nach EnEV 2009.

Als Anlagenkonzepte werden kostengünstige Kombispeicher (Bild 2.2.2-95) oder Frischwasserstationen (Bild 2.2.2-96), immer seltener Zwei-Speicherkonzepte, eingesetzt. Wichtig für einen hohen Solarertrag ist die Temperaturschichtung des Speichers, da lange Laufzeiten der Kollektorkreispumpe nur bei geringen Temperaturniveaus im unteren Speicherbereich möglich sind.

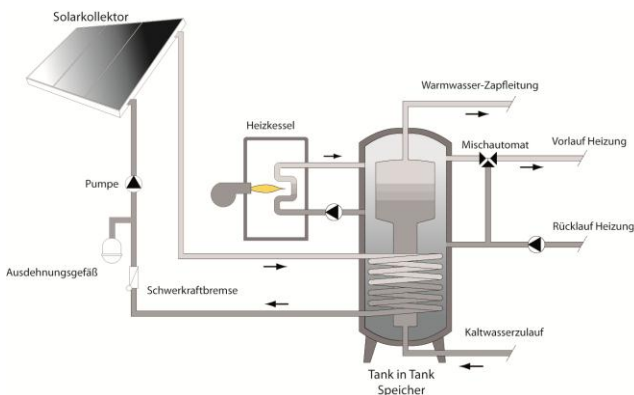


Bild 2.2.2-95. Solaranlage zur Heizungsunterstützung mit Kombispeicher.

Um das Verkeimungsrisiko des Trinkwassers bei langen Standzeiten im Speicher zu verringern, wird das Trinkwasser in Frischwasserstationen nur bei Zapfung erwärmt.

Dazu ist eine drehzahlgeregelte Pumpe erforderlich und ein Wärmeübertrager hoher Leistung (Bild 2.2.2-96).

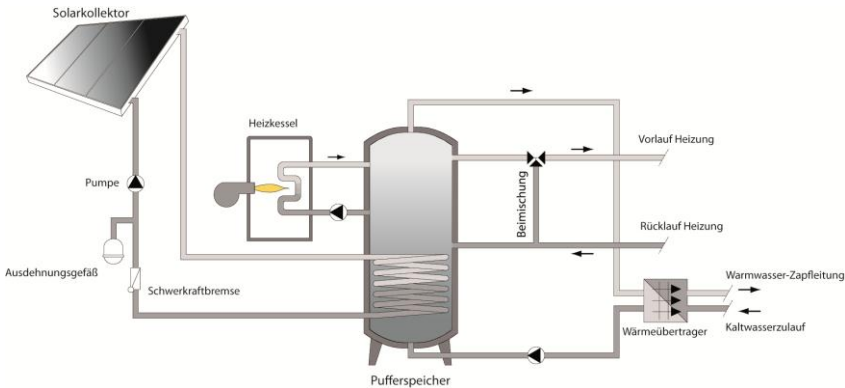


Bild 2.2.2-96. Solaranlage zur Heizungsunterstützung mit Frischwasserstation

Für die Nachheizung werden bei solarthermischen Anlagen entweder fossil oder Biomasse befeuerte Heizkessel oder elektrische Wärmepumpen eingesetzt. Bei der Kombination mit Wärmepumpen sind verschiedene Systemkonfigurationen möglich: entweder heizen Solaranlage und Wärmepumpe auf denselben Speicher (Trinkwasser oder Pufferspeicher), oder die thermische Energie der Solaranlage wird als Quelle für den Verdampfer der Wärmepumpe genutzt. Dadurch sind beträchtliche Steigerungen der Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe möglich. Zum einen reduziert die thermische Solaranlage die Laufzeit der Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung, die aufgrund der hohen Temperaturen energetisch ungünstig ist. Zum anderen steigt durch die Solarwärme die Quelltemperatur der Wärmepumpe mit entsprechender Leistungszahlsteigerung. Da nach dem EEWärmeG die Jahresarbeitszahl von Luft/Wasserwärmepumpen im Neubau bei mindestens 3,5, im Bestand bei 3,3 liegen muss, bei Sole/Wasser WP bei 4,0 bzw. 3,8, kann die thermische Solaranlage zum Erreichen der anspruchsvollen Zielwerte beitragen.

Bei einer solarthermischen Anlage mit 15 m<sup>2</sup> Kollektorfläche steigt die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe bei Trinkwassererwärmung und thermischer Unterstützung der Wärmepumpenverdampfung um 5%. Wird der thermische Ertrag der Solaranlage dem Wärmepumpensystem komplett zugeschlagen, ergibt sich eine Jahresarbeitszahlsteigerung von etwa 35%. Die Systemgrenze für die Ermittlung der Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe berücksichtigt jedoch nach VDI 4650-2009 den Solarertrag nicht (Lang, 2009).

### 5.3.3 Solare Großanlagen

Während der Hauptmarkt für solarthermische Anlagen weiterhin der Ein- und Zweifamilienhausbereich ist, bieten erst große Solaranlagen ein deutliches Kostenreduktionspotential. Solare Großanlagen für die Warmwasserbereitung mit Kurzzeitspeichern werden dabei typisch für 10-20 % solaren Deckungsanteil ausgelegt, um auch bei sommerlichen Schwachlastzeiten den Stillstand zu vermeiden. Bei gleichzeitiger zentraler Raumwärmeversorgung werden oft Vier-Leiter Netze verwendet, um die unterschiedlichen Temperaturbereiche für die Warmwassererwärmung und Raumheizung besser regeln zu können. Zur Kosten- und Wärmeverlustreduzierung haben sich jedoch Zwei-Leiter Netze als extrem effizient

herausgestellt (Bild 2.2.2-97). Die Vorlauftemperaturen liegen dabei je nach Auslegung zwischen 55 und 65°C, die Rücklauftemperaturen können bei gutem hydraulischen Abgleich unter 35°C gehalten werden und sorgen für eine hohe Gesamteffizienz. Detaillierte Messungen an 10 solar unterstützten Wärmenetzen zeigten, dass bei solaren Gesamtdeckungsgraden von 12 bis 20% Amortisationszeiten von 10 bis 25 Jahren erreicht wurden bei Anlagenlebensdauern von mindestens 25 Jahren (Fink et al, 2006).

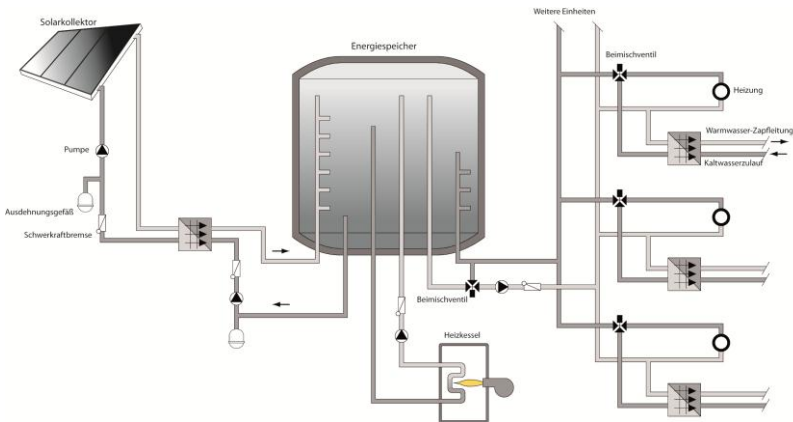


Bild 2.2.2-97. Systemschema für große Solaranlagen im Geschosswohnungsbau zur Heizungsunterstützung mit Frischwasserstation

Eine geschichtete Einspeicherung der Solarwärme ist durch innenliegende Steigrohre mit Membranklappen möglich, die einen Austritt erwärmten Fluids geringer Dichte erst in einer Höhe ermöglichen, an der das umgebende Speicherfluid ebenfalls eine geringe Dichte und damit hohe Temperatur aufweist. Die Heizwärme wird aus dem oberen Speicherbereich abgezogen und in Abhängigkeit von der Heizungsrücklauftemperatur geschichtet wieder eingespeichert. Alternativ kann die Einspeisung extern über Dreiwegeventile temperaturabhängig gesteuert werden.

Solaranlagen mit Mehrtages speichern können Deckungsgrade bis etwa 35% erreichen. In Kombination mit einer Wärmepumpe kann der solare Deckungsgrad auf 40 - 50% gesteigert werden.

Höhere Deckungsgrade können nur mit saisonalen Speichern erreicht werden. Bei saisonaler Speicherung mit Heisswasserspeichern sind etwa 1.5 – 2.5 m<sup>3</sup> pro Quadratmeter Kollektorfläche erforderlich, bei Speichern mit geringerer Wärmekapazität wie Kies-Wasser-Speicher etwa 2.5 – 4 m<sup>3</sup> pro m<sup>2</sup>. Erdsondenspeicher benötigen etwa 8-10 m<sup>3</sup> pro m<sup>2</sup> und Aquiferspeicher 4 bis 6 m<sup>3</sup> pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche. Seit Mitte der 90er Jahre sind etwa 10 solar Großanlagen mit saisonalen Speichern gebaut worden mit Deckungsanteilen zwischen 40 und 50%. Projekterfahrungen aus Friedrichshafen mit 4050 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 12.000 m<sup>3</sup> Heisswasserspeicher sowie aus Neckarsulm mit 5670 m<sup>2</sup> sowie einem großen Erdsondenspeicher mit 63360 m<sup>3</sup> zeigen, dass solare Deckungsanteile am Gesamtwärmebedarf (Trinkwarmwasser und Heizwärme) durchaus hoch liegen können. Im Jahr 2007 wurden für 390 Wohneinheiten in Neckarsulm gemessen (Bauer et al, 2009). Durch Netzverteilung und Speicherverluste liegen die Bruttowärmeerträge meist geringer als bei Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung. Netto ins Netz eingespeist wurde in obigen Anlagen zwischen 218 und 238 kWh/m<sup>2</sup>a. Nahwärmenetze mit solarthermischen Anlagen müssen auf niedrige Vorlauftemperaturen von etwa 55-65°C und möglichst geringe Rücklauftemperaturen

um 30°C ausgelegt sein. Eine hohe Temperaturspreizung reduziert den erforderlichen Pumpenstrom für die Verteilung. Eine gleitende Vorlauftemperaturregelung reduziert die Verteilverluste im Netz.

#### **-5.3.4 Schwimmbadheizung**

Die Schwimmbadheizung kann mittels einfacher kostengünstiger Absorber erfolgen, da die Beckenwassertemperatur in der Regel unter 30°C liegt. Das Schwimmbecken dient als Speicher für die Solarenergie. Ein zusätzlicher separater Speichertank wie bei der Wassererwärmung entfällt. Bei der Freibadbeheizung liegt der Energiebedarf von Mai bis September zeitlich gleich mit einem relativ hohen Sonnenenergieangebot. Solaranlagen zur Beheizung von Freibädern können daher mit Wärmepreisen von etwa 0.04-0.07 €/kWh wirtschaftlich betrieben werden.

Das Schwimmbeckenwasser wird direkt durch die Absorber geleitet und um 2 bis 4 K erwärmt. In der Regel reichen 0.5 bis 0.8 m<sup>2</sup> Absorberfläche pro m<sup>2</sup> Wasserfläche aus. Bei den geringen Temperaturerhöhungen sind hohe Durchflüsse von 80 – 110 l/m<sup>2</sup>h üblich. Der jährliche Wärmegewinn beträgt etwa 250 - 300 kWh/m<sup>2</sup> a.

Die Absorber werden als Kunststoffmatten oder als Rohrsysteme hauptsächlich aus Polypropylen (PP) und Ethylen-Propylen-Dien-Monomeren (EPDM) gefertigt. PP-Absorber sind im gefüllten Zustand nicht frostsicher. In den Wintermonaten muss der wassergefüllte Absorber entleert werden. Die Haltbarkeit von PP-Absorbern wird mit mehr als 20 Jahren angenommen. Die Haltbarkeit von EPDM-Kunststoff liegt erfahrungsgemäß bei über 30 Jahren. Diese Absorber sind auch im gefüllten Zustand frostsicher.

Kunststoffabsorber lassen sich direkt auf Flachdächern oder Dächern mit geringer Neigung ohne Ständergerüst kostengünstig installieren. Ohne Installation kostet 1 m<sup>2</sup> Kollektorfläche ca. 35 €. Für eine Großanlage mit 1500 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und Gesamtkosten von etwa 100 € pro m<sup>2</sup> inklusive Planung, Montage und Verrohrung kann ein Wärmepreis unter 0.05 € pro kWh erzielt werden und somit eine Amortisationszeit unter 5 Jahren. Von 3500 öffentlichen Freibädern in Deutschland sind heute etwa 800 Bäder mit Solaranlagen ausgestattet.

#### **-5.4 Ausblick**

Neben der klassischen Dachmontage von Solarkollektoren werden zunehmend gebäudeintegrierte Solaranlagen realisiert, um Nullemissionshäuser verwirklichen zu können. Besonders die Fassadenintegration von Kollektoren ermöglicht hohe Kollektorflächen für die Heizungsunterstützung bei geringerem Überhitzungsproblem im Sommer. Energiespeicherung bleibt ein wichtiges Thema, da der solare Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf steigen soll. Mittelfristig werden aus Kostengründen Wasserspeicher den Markt bestimmen, zur Erhöhung der Speicherdichte sind jedoch Latentwärmespeicher mit etwa doppelten Speicherdichten oder thermochemische Speicher mit bis zu 10 fachen Speicherdichten sehr vielversprechend.

Solarthermische Anlagen werden heute noch vorwiegend im Ein- und Zweifamilienhaus bereich eingesetzt. Für Mehrfamilienhäuser sind zunehmend standardisierte Anlagenpakete mit modularer Hydraulik und effizienter Anlagenregelung samt Fernüberwachung und Parametrierung verfügbar. Dieser Trend reduziert den Planungsaufwand und die Kosten und erhöht die Anlageneffizienz.

Große Solaranlagen sind deutlich kostengünstiger zu betreiben als dezentrale Kleinanlagen, die derzeit noch den Markt dominieren. Bei Großanlagen mit Kurzzeitspeichern für die Trinkwassererwärmung oder Heizungsunterstützung liegen die solaren Deckungsgrade meist zwischen 10 und 20%. Erst die solare Nahwärme mit saisonalen Speichern ermöglicht Deckungsgrade von 50% oder mehr. Durch den zunehmenden Ausbau von netzgebundener Wärmeversorgung soll der Anteil der Solarthermie am Gesamt Wärmebedarf Deutschlands bis 2050 auf 25% steigen.

Effiziente Zweileiter-Netze mit Wohnungsstationen werden zukünftig vermehrt in Mehrfamilienhäusern und Wohnsiedlungen eingesetzt. Bei Kollektorflächen weit über 100 m<sup>2</sup>, hoher ganzjähriger Wärmeabnahme und gewerblicher Nutzung sind bereits

heute sehr günstige Wärmegestehungskosten von 0.05 bis 0.10 €/kWh möglich.

## Literatur

D.Bauer, W.Heidemann, R.Marx, J.Nußbicker-Lux, F. Ochs, V. Panthaloookaran, S.Raab (2009). Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMU Vorhaben 0329607J

C.Fink, R.Riva, M.Pertl, W.Wagner (2006) OPTISOL – messtechnisch begleitete Demonstrationsprojekte für optimierte und standardisierte Solarsysteme im Mehrfamilienwohnungsbau, Endbericht AEE Gleisdorf

R. Lang (2009) Potentiale der Effizienzsteigerung durch Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpen, VDI Bericht 2074

J. Nitsch (2008) Leitstudie 2008 - Weiterentwicklung der Ausbastrategie Erneuerbare Energien vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin.

V.Wesselak, T. Schabbach Regenerative Energietechnik (2009). Springer Verlag ISBN 978-3-540-95881-9